

梁璋成, 苏昊, 陈秉彦, 等. 酿酒酵母菌剂等温干燥曲线及其存活率干燥动力学 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (12): 1612–1618.

LIANG Z C, SU H, CHEN B Y, et al. Dehydration Isotherm and Vitality Kinetics of Dried *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (12): 1612–1618.

酿酒酵母菌剂等温干燥曲线及其存活率干燥动力学

梁璋成^{1,2,3}, 苏昊^{1,2,3}, 陈秉彦^{1,2,3}, 林晓姿^{1,2,3}, 窦芳娇^{1,2}, 何志刚^{1,2,3}

[1. 福建省农业科学院农业工程技术研究所, 福建 福州 350003; 2. 福建省农产品(食品)加工重点实验室, 福建 福州 350003; 3. 农业农村部亚热带特色果蔬菌加工重点实验室(省部共建), 福建 福州 350003]

摘要:【目的】为高活力酿酒酵母直投式发酵剂的研发提供理论和技术支持。【方法】以酿酒酵母 JH301 为研究对象, 采用沸腾炉热风干燥技术制备菌剂, 研究不同温度下酿酒酵母沸腾炉热风干燥过程水分含量、菌存活率的变化及其相关性, 建立酿酒酵母菌剂等温干燥曲线及其存活率干燥动力学模型, 并采用核磁共振技术考察酵母菌沸腾炉热风干燥过程水分迁移分布规律。【结果】(1) 酿酒酵母菌剂沸腾炉热风干燥过程等温干燥曲线符合 Henderson 指数函数模型 $M=a \times \exp(b \times T)$, a 、 b 均为与干燥温度 W 相关的常数。(2) 随着干燥过程菌剂水分含量的下降, 菌存活率呈先平缓下降后快速下降趋势, 存在菌存活率拐点水分阈值。在拐点水分阈值前后, 菌存活率干燥动力学模型分别符合模型 $y_{\text{前}}=a_{\text{前}}x+b_{\text{前}}$ 、 $y_{\text{后}}=a_{\text{后}}x+b_{\text{后}}$, a 、 b 均为与温度 (W) 相关的常数。 $y_{\text{前}}$ 与 $y_{\text{后}}$ 的交叉点即为菌存活率拐点水分阈值, 菌存活率拐点水分阈值与干燥温度呈正相关, 菌存活率与细胞结合水的逃逸速率呈负相关。(3) 菌存活率拐点水分阈值的最低干燥温度理论值为 41.2 °C。通过对模型参数预测与验证, 适宜的干燥温度为 42 °C, 时间为 20 min, 菌剂水分含量为 (5.24±0.12)%, 菌存活率可达 (48.24±0.15)%。【结论】通过调控热风干燥过程酿酒酵母结合水的逃逸速率, 可提高菌存活率。

关键词: 酿酒酵母菌剂; 菌存活率; 水分阈值; 沸腾炉热风干燥; 水分分布

中图分类号: TS 201

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 12-1612-07

Dehydration Isotherm and Vitality Kinetics of Dried *Saccharomyces cerevisiae*

LIANG Zhangcheng^{1,2,3}, SU Hao^{1,2,3}, CHEN Bingyan^{1,2,3}, LIN Xiaozhi^{1,2,3}, DOU Fangjiao^{1,2}, HE Zhigang^{1,2,3}

[1. Institute of Agricultural Engineering Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China;

2. Fujian Key Laboratory of Agricultural Products (Food) Processing, Fuzhou, Fujian 350003, China; 3. Key Laboratory of Subtropical Characteristic Fruits, Vegetables and Edible Fungi Processing (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fuzhou, Fujian 350003, China]

Abstract: 【Objective】Isotherm of dehydration process and kinetics of survival rate of a dried *Saccharomyces cerevisiae* product were studied for the development of a highly active yeast product with extended shelf life for vinification.

【Method】*S. cerevisiae* JH301 was used in the fluidized hot air oven dehydration experimentation. Under varied hot air temperatures, the moisture content and survival rate of *S. cerevisiae* were monitored to construct dehydration isotherms and analyze yeast vitality. Water migration and distribution in the drying yeasts were determined by a nuclear magnetic resonance method. 【Results】(1) The dehydration isotherm followed the Henderson exponential equation of $M=a \times \exp(b \times T)$, where a and b were the constants related to the drying temperature (W) as $a=-0.31W+81.36$ and $b=-0.0094W+0.27$. (2) The yeast survival rate declined gradually at first, and then, rapidly as the moisture content decreased with time in the process. A water threshold appeared at the inflection point of the yeast survival rate curve. The kinetic equations before the threshold point were $y_1=a_1x+b_1$, and after the point $y_2=a_2x+b_2$, where $a_1=0.014W+0.20$, $b_1=-0.90W+81.64$, $a_2=0.36W-14.04$, and $b_2=-2.77W+159.40$. The moisture content at the point where y_1 and y_2 intersected, or the water threshold, positively correlated

收稿日期: 2022-09-10 初稿; 2022-12-10 修改稿

作者简介: 梁璋成 (1985-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品发酵与酿造 (E-mail: 81841201@qq.com);

通信作者: 何志刚 (1964-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工、食品发酵 (E-mail: njgzx@163.com)

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2021J01501、2020J011373); 福建省科技计划公益类专项 (2020R1032005、2020R1032008); 福建省农业高质量发展超越“5511”协同创新工程项目 (XTCXGC2021019-GCS01)

with the processing hot air temperature, while the yeast survival rate negatively correlated with the rate of bounded water evaporated from the yeast cells. (3) A theoretical minimum drying temperature was determined to be 41.2 °C. Based on the kinetic model prediction and a follow-up experimental verification, the optimal yeast dehydration was determined to be conducted at 42 °C for 20 min. A final moisture content of (5.24±0.12)% with a survival rate of (48.24±0.15)% on the dried yeast product was achieved. 【Conclusion】 The vitality of the dried *S. cerevisiae* could be maximized by controlling the evaporation of bounded yeast cellular water in the hot air dehydration process.

Key words: *Saccharomyces cerevisiae*; yeast survival rate; water threshold; fluidized hot air drying; water distribution

0 引言

【研究意义】酿酒酵母直投式菌剂是以固体干物质形式存在、可使酵母菌在常温下长期贮存而不失去活性、在一定条件下复水活化后即恢复成自然状态并具有正常酵母活性的细胞^[1-3]。高活力酵母直投式菌剂的研发与应用,对酿酒酵母产业化推广应用具有重要意义^[4]。【前人研究进展】常用的菌剂干燥方法有冷冻干燥、喷雾干燥、真空干燥、流化床热风干燥、沸腾炉干燥等^[5]。孙康等^[6]优化了美极梅奇酵母真空冷冻干燥的复合保护剂配方,确定了最佳离心条件,菌存活率可达 90% 以上;李东歌等^[7]采用鼓风干燥技术制备出葡萄酒酿酒活性干酵母;周亚男等^[8]研究了鲁氏酵母的喷雾干燥最佳工艺,并建立干燥过程菌存活率与喷雾进口温度的干燥动力学模型;张鸿雁等^[9]优化了膜醅毕赤酵母真空干燥预处理工艺,提高了菌活性。可见,冷冻干燥技术存在菌体存活率高的优点,但其生产成本较高、干燥时间较长,不适宜酵母的产业化应用^[5]。喷雾干燥、沸腾炉干燥等高温热风干燥技术存在高效、低耗能和可连续生产的特点^[10],但干燥过程中高温和失水会对微生物产生损伤或死亡,降低菌体活力^[11],影响菌剂在生产上的使用效果^[12]。因此,研究酵母菌在热风干燥时快速死亡机制、提高酵母菌在热风干燥过程的存活率,是酿酒酵母菌剂制备的关键。【本研究切入点】已有研究结果发现,热风干燥过程干燥温度、干燥时间、干燥保护剂配比等条件会对菌存活率产生显著影响^[13-15],但其影响机制尚不明晰,鲜有见菌存活率与水分含量、干燥温度相关性及其最适干燥温度理论极值的研究报道。【拟解决的关键问题】本文旨在研究干燥温度、时间等条件对水分含量变化及菌存活率的影响,阐明酵母菌在热风干燥时快速死亡机制,明确干燥温度理论极值,建立酿酒酵母菌剂热风干燥过程等温干燥曲线及其存活率干燥动力学模型,研究干燥温度、水分含量与菌存活率的相关性,明确高活力酿酒酵母菌

热风干制的关键控制点,为高活力酿酒酵母直投式发酵剂的研发提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 菌株

酿酒酵母 JH301: 分离于红曲米,由福建省农产品(食品)加工重点实验室选育,保藏号: CCTCC M2015226^[16]。

1.2 培养基

红曲糟多肽糖蜜培养基: 参照苏昊等^[17]的方法配置,用于酿酒酵母的培养。

孟加拉红培养基: 市售,用于酿酒酵母计数。

1.3 仪器与设备

SPX-250BS-II 生化培养箱,上海新苗医疗器械制造有限公司; YXQ-CS-50S II 全自动立式压力蒸汽灭菌器,上海博达实业有限公司医疗设备厂; SW-CJ-1FD 型单人单面净化工作台,苏州净化设备有限公司; UV-1750 紫外可见分光光度计,苏州岛津仪器有限公司; FE28 型 pH 酸度计,梅特勒-托利多; HH-8 数显电热恒温水浴锅,常州亿通分析仪器制造有限公司; KRH-BPJ50 微生物发酵罐,江苏科海生物工程有限公司; GQ142RZ 管式离心机,绍兴市搏盛机械科技有限公司; XMGY1/250-U 隔膜式压滤机,大洋机械有限公司; AD500S-HCH-30 型槽形混合机,常州市凯全干燥设备有限公司; ZL-150G 型高效旋转式颗粒机,江阴市高宏机械制造有限公司; FG-15 沸腾干燥机,江苏先锋干燥工程有限公司。

1.4 菌剂制备工艺流程

JH301 活化→发酵罐发酵→离心取菌泥→加水重悬→调整菌悬液 pH 值→压榨收集菌泥→加保护剂搅拌→造粒→沸腾炉热风干燥→包装成品。

1.5 酵母菌的培养与造粒

将酿酒酵母 JH301 菌种接入红曲糟多肽糖蜜培养基,在 (30±1) °C 培养 24 h,获得种子液。将种子液以 5% 的接种量接入红曲糟多肽糖蜜培养基,于 (25±1) °C 发酵 18 h。发酵液在 10000 g 离心,取菌泥加 10 倍重量无菌水重悬,调节 pH 值至 6.5±0.1,

压滤机压榨,取菌泥添加一定量红曲糟多肽,混合均匀,60 目筛网造粒,得到酵母菌颗粒。

1.6 酿酒酵母菌剂沸腾炉热风干燥工艺

将菌颗粒置于沸腾炉中,分别在 40、45、50、55、60 ℃ 干燥一定时间。每间隔 2 min 取样检测菌剂水分含量和菌存活率等指标,绘制菌剂沸腾炉干燥过程等温干燥曲线;分析水分含量变化与菌存活率相关性,建立菌存活率干燥动力学模型;并采用核磁共振技术考察不同温度热风干燥过程水分分布的变化规律。

1.7 指标测定

1.7.1 酿酒酵母生物量 参照 GB 4789.15—2016《食品卫生微生物学检验霉菌和酵母计数》^[18]中的方法,采用平板计数法测定酵母菌生物量。

1.7.2 菌剂水分含量测定 参照 GB 31639—2016《食品加工用酵母》^[19]中的水分测定方法。

1.7.3 热风干燥过程菌存活率计算

$$Y/\% = \frac{(100 - M_0) \times G_t}{(100 - M_t) \times G_0} \times 100$$

式中, M_t 表示干燥 t min 后菌剂水分含量, $\text{g} \cdot \text{hg}^{-1}$; G_t 表示干燥 t min 后菌剂生物量, $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$; M_0 干燥前湿菌泥水分含量, $\text{g} \cdot \text{hg}^{-1}$; G_0 干燥前湿菌泥生物量, $\text{cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.7.4 水分分布的测定 采用低频氢谱核磁共振仪测试干燥后酵母菌剂的水分弛豫时间,以评价各水分组成变化。称取 1.00 g 酵母菌粉于 15 mm 口径的核磁管中进行水分测试,采用 CPMG 程序系列测试。测试温度 25 ℃,重复采样间隔时间为 2500 ms,回波时间为 0.1 ms,回波数量为 6000,累计采样次数为 8 次。仪器记录下不同水分组分的信号强度,

弛豫时间 0~1 ms 为结合水,弛豫时间 1~100 ms 为束缚水,弛豫时间 100 ms 以上为自由水^[20]。

1.7.5 热风干燥过程结合水逃逸速率计算

$$S/(\text{Au} \cdot \text{min}^{-1}) = \frac{(X_0 - X_t)}{T_t}$$

式中, X_t 表示干燥 t min 后菌剂弛豫时间 0~1 ms 结合水强度, Au; X_0 表示湿菌泥弛豫时间 0~1 ms 结合水强度, Au; T_t 表示干燥时间, min。

1.8 数据分析

采用 R 语言、DPS6.01、Origin 等软件进行数据分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 酿酒酵母菌剂热风干燥等温干燥曲线

酵母菌颗粒在 40 ℃、45 ℃、50 ℃、55 ℃、60 ℃ 下干燥,绘制酿酒酵母等温干燥曲线(图 1)。不同温度沸腾炉热风干燥过程中,酵母菌剂水分含量均呈先快速下降后趋于平缓的趋势。酿酒酵母菌剂热风干燥等温干燥曲线符合 Henderson 指数函数模型^[21] $M=a \times \text{EXP}(b \times T)$, M 代表水分含量 ($\text{g} \cdot \text{hg}^{-1}$), T 代表干燥时间 (min), a 、 b 均为与干燥温度 W 相关的常数。进一步拟合求解,得出 $a=-0.31W+81.36$ ($R^2=0.968$), $b=-0.0094W+0.27$ ($R^2=0.956$)。对 40 ℃、45 ℃、50 ℃、55 ℃、60 ℃ 下干燥曲线方程进行拟合验证,决定系数 R^2 分别为 0.987、0.972、0.967、0.978、0.982,说明该等温干燥曲线模型 $M=a \times \text{EXP}(b \times T)$ 实测值与预测值均拟合较好,可用来反映酿酒酵母不同温度沸腾炉热风干燥过程水分含量的变化规律。

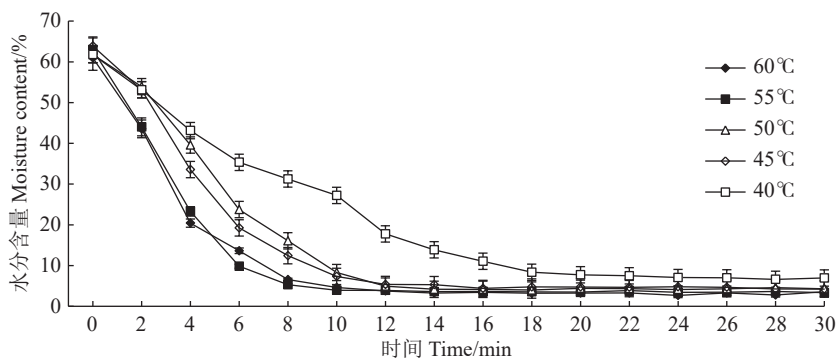


图 1 酿酒酵母菌剂热风干燥过程水分含量的变化

Fig. 1 Changes on moisture content of *S. cerevisiae* during hot air dehydration

2.2 酵母菌存活率的热风干燥动力学

由图 2 可知,酿酒酵母沸腾炉热风干燥过程中,随着菌剂水分含量的下降,菌存活率呈先平缓

下降后快速下降趋势,各温度干燥过程均存在菌存活率拐点水分阈值。在水分含量高于菌存活率拐点水分阈值的干燥期,菌存活率下降缓慢;在水分含

量低于菌存活率拐点水分阈值的干燥期，菌存活率快速下降。以菌存活率拐点水分阈值为分界，菌存活率干燥动力学模型分别符合： $y_{前}=a_{前}x+b_{前}$ 、 $y_{后}=a_{后}x+b_{后}$ ，其中 $y_{前}$ 、 $y_{后}$ 代表水分阈值前、后干燥期的菌存活率， a 、 b 均为与温度 W 相关的常数。进一步通过拟合分析，可得 $a_{前}=0.014W+0.20$ ($R^2=0.967$)、 $b_{前}=-0.90W+81.64$ ($R^2=0.983$)、 $a_{后}=0.36W-14.04$ ($R^2=0.989$)、 $b_{后}=-2.77W+159.40$ ($R^2=0.995$)。对各温度干燥动力学方程进行拟合验证，决定系数 R^2 均达 0.95 以上，说明所建立的干燥动力学模型 $y_{前}=a_{前}x+b_{前}$ 和 $y_{后}=a_{后}x+b_{后}$ 的实测值与预测值均拟合较好，可用来反映系统内在规律。 $y_{前}$ 与 $y_{后}$ 的交叉点即为菌存活率拐点水分阈值，即当 $a_{前}=a_{后}$ 时，不存在菌存活率拐点水分阈值，存在存活率拐点水分阈值最低干燥温度的理论值为 41.2 ℃。

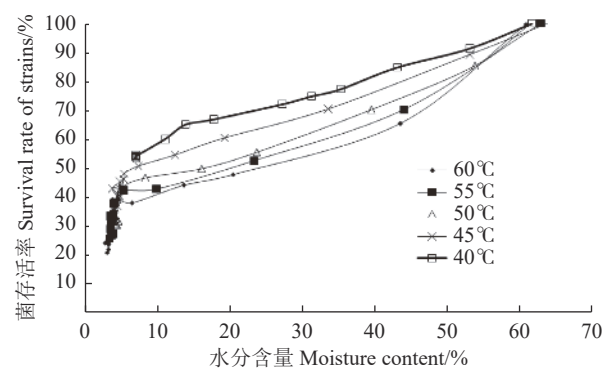


图 2 不同温度热风干燥过程酿酒酵母菌剂水分含量与菌存活率的相关性

Fig. 2 Correlation between moisture content and survival rate of *S. cerevisiae* during dehydration with different hot air temperatures

2.3 模型参数预测与验证

根据菌存活率干燥动力学及等温干燥曲线模型测算，不同干燥温度的酿酒酵母菌剂菌存活率及其拐点水分阈值预测值见表 1。菌存活率拐点水分阈值 (Y)、菌存活率 (Z)、干燥时间 (T) 与干燥温度 (W) 的相关性分别符合模型 $Y=0.024W+3.86$ ($R^2=0.830$)、 $Z=-0.81W+81.91$ ($R^2=0.999$)、 $T=-0.80W+54.52$ ($R^2=0.873$)。菌存活率拐点水分阈值均低于 GB 31639—2016《食品加工用酵母》要求的 5.5%。热风干燥过程干燥温度与菌存活率拐点水分阈值呈正相关，与菌存活率、干燥时间均呈负相关，因此选择最优干燥温度应为存在菌存活率拐点水分阈值的最低温度。理论最优干燥温度为 41.2 ℃，干燥时间 20.8 min，菌存活率 49.03%。但考虑到干燥工艺温度会有 ± 0.5 ℃ 的波动，因此选择干燥温度为 42 ℃，根据等温干燥曲线模型测算，42 ℃ 条件下菌剂干燥

至水分含量 5.5% 的干燥时间为 19.7 min。试验通过采用 42 ℃ 沸腾炉干燥 20 min 进行验证，此条件下干燥的菌剂水分含量为 $(5.24\pm 0.12)\%$ ，菌存活率为 $(48.24\pm 0.15)\%$ ，与菌存活率干燥动力学及等温干燥曲线模型预测值水分含量 5.21%、菌存活率 48.10% 的差异均不显著 ($P>0.05$)。

表 1 不同干燥温度菌存活率拐点水分阈值的模型预测值

Table 1 Predicted water threshold at inflection point on kinetic equations of *S. cerevisiae* survival rate under different drying temperatures

干燥温度 Temperature/℃	干燥时间 Time/min	菌存活率拐点水分阈值 Water threshold inflection point of survival rate of strains/%	菌存活率 Survival rate of strains/%
60	8.3	5.28	33.22
55	10.0	5.25	37.35
50	12.5	5.17	41.44
45	16.7	4.90	45.37
42	23.9	3.15	46.42

2.4 不同温度热风干燥过程酵母菌细胞水分分布的变化

采用核磁共振技术，考察酵母菌沸腾炉干燥过程与菌存活率拐点水分阈值最接近的 3 个取样时间点的菌剂水分迁移分布变化规律，结果见图 3，横坐标代表横向弛豫时间，它表征水分流动性，弛豫时间值越小代表该水分的流动性越小，与菌细胞结合越紧密^[22,23]；计算酵母菌剂热风干燥过程结合水 (0~1 ms)、束缚水 (1~100 ms) 和自由水 (100 ms 以上) 的强度变化^[20]，结果见表 2。在沸腾炉热风干燥过程中，随着菌剂水分含量的下降，结合水、束缚水和自由水均呈下降趋势。在水分含量高于菌存活率拐点水分阈值的干燥期，菌剂水分含量较高，干燥过程逃逸的水分主要为自由水、部分的束缚水；在水分含量低于菌存活率拐点水分阈值的干燥期，自由水、束缚水含量处于较低水平，干燥逃逸的水分主要为结合水。45 ℃、50 ℃、55 ℃、60 ℃ 干燥 12 min 时的结合水逃逸速率分别为 0.02、49.62、83.79、96.15 ($\text{Au}\cdot\text{min}^{-1}$)，可见干燥温度越低，结合水逃逸速率越慢，菌存活率越高；干燥温度越高，结合水逃逸速率越快，菌存活率越低。结果表明，在酵母菌剂热风干燥过程中，细胞结合水的逃逸速率与菌存活率负相关，是菌快速死亡的主要影响因素。

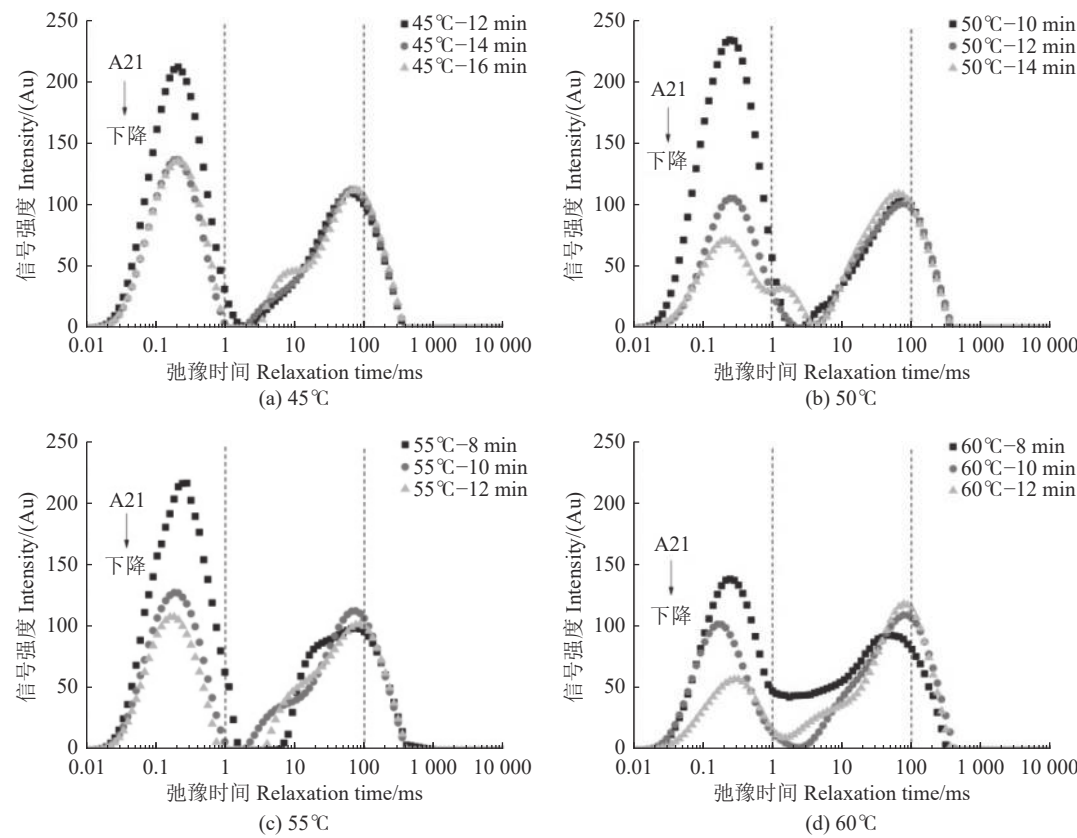


图 3 酿酒酵母热风干燥过程酵母菌细胞水分分布
Fig. 3 Cellular water distribution of *S. cerevisiae* during hot air dehydration

表 2 热风干燥过程酵母菌剂理化指标的变化
Table 2 Changes on physiochemical indices of *S. cerevisiae* during hot air dehydration

干燥温度 Temperature/℃	干燥时间 Time/min	水分含量 Moisture content/%	结合水含量 Combined water content/Au	束缚水含量 Bound water content/Au	自由水含量 Free water content/Au	菌存活率 Survival rate of strains/%	结合水逃逸速率 Escape rate of combined water/ (Au·min ⁻¹)
45	12	7.33±0.12	1649.06±25.34	700.02±36.82	369.41±5.47	49.72±0.32	0.02±0.00
	14	5.31±0.36	1255.67±38.63	947.65±38.03	267.42±15.25	46.12±0.06	28.11±2.15
	16	4.40±0.06	1087.21±23.44	911.21±45.45	229.07±25.51	42.01±0.06	35.13±2.18
50	10	8.30±0.24	1634.83±15.85	457.72±15.19	239.38±23.99	45.06±0.00	1.44±0.01
	12	4.96±0.18	1053.79±43.64	982.08±42.74	198.16±28.16	41.00±0.16	49.62±0.73
	14	4.17±0.06	761.07±25.34	934.04±28.51	158.20±21.35	36.02±0.32	63.44±1.15
55	8	9.84±0.12	1627.97±37.44	777.24±13.28	298.61±23.34	40.89±0.32	2.66±0.10
	10	5.29±0.06	933.68±33.68	859.06±35.46	264.82±17.13	37.31±0.06	71.56±1.12
	12	3.95±0.06	643.76±12.77	850.28±35.31	123.76±12.33	29.74±0.32	83.79±1.03
60	8	6.55±0.18	1197.14±15.31	806.91±18.64	260.68±10.65	38.17±0.06	56.52±2.12
	10	4.63±0.18	844.76±22.19	980.59±22.11	186.94±5.34	30.68±0.18	80.45±3.05
	12	3.76±0.06	495.51±5.34	1047.06±15.12	158.90±25.11	23.42±0.18	96.15±1.12
CK	0	60.97±0.06	1649.27±18.83	5471.2±35.15	6788.8±38.34	100±0.00	

3 讨论与结论

酵母菌剂常用的干燥方法有冷冻干燥、喷雾干燥、沸腾炉干燥等。冷冻干燥技术菌存活率较高，通常在 90% 以上^[6]，但存在生产成本较高、干燥时间较长等缺点^[5,24]。热风干燥技术虽然干燥成本较低，但干燥过程中温度和时间会对菌存活率产生较大影响。本研究在 45~60 ℃ 条件下干燥 30 min，菌存活率均低于 25%。已有学者通过研究适宜热风干燥工艺、筛选适宜干燥保护剂，提高了热风干燥菌存活率^[7-8,13-15]，最高可达 90% 以上^[9]。因此综合考虑成本和菌存活率，酿酒酵母适宜的干燥方式为热风干燥。

虽然国内外学者已有针对热风干燥工艺的诸多报道，但酵母菌在热风干燥时快速死亡机制尚不明晰，适宜干燥温度的理论极值也未见报道。本文建立了酿酒酵母热风干燥过程菌存活率干燥动力学模型： $y_{前}=a_{前}x+b_{前}$ 、 $y_{后}=a_{后}x+b_{后}$ ，发现酿酒酵母热风干燥过程中，随着菌剂水分含量的下降，菌存活率呈先平缓下降后快速下降趋势，存在菌存活率拐点水分阈值（ $y_{前}$ 与 $y_{后}$ 的交点）。在水分含量高于菌存活率拐点水分阈值的干燥期，菌剂水分含量较高，干燥逃逸的水分主要为自由水、束缚水，干燥过程菌存活率缓慢下降，结合水含量几乎没有变化；在水分含量低于菌存活率拐点水分阈值的干燥期，此时自由水和束缚水含量较低，干燥逃逸的水分主要为结合水，干燥过程菌存活率快速下降。结合水是酵母菌细胞膜的主要水分，与构成细胞膜的生物大分子（如蛋白质、多糖等）具有较强的相互作用，结合得非常紧密^[25,26]。本研究结果表明，细胞结合水的逃逸速率与菌存活率负相关，这与菌细胞脱结合水会引起膜的流动性的改变、破坏蛋白质与水分子、细胞膜之间的相互作用力有关，导致维持蛋白质正常三级结构的作用力减弱，从而引起蛋白质构象发生改变从而丧失功能^[27]；同时菌细胞脱水会引起细胞膜的脂质氧化，使细胞膜结构和稳定性发生变化^[28]，致使菌体快速死亡。因此，在热风干燥过程中，应选择较低的温度，并控制菌剂最终水分含量在菌存活率拐点水分阈值与国标要求的 5.5% 之间，以使菌剂保持较高的菌存活率。本研究通过对酿酒酵母菌剂等温干燥曲线及其存活率干燥动力学的测算，明确菌存活率拐点水分阈值的最低干燥温度理论值为 41.2 ℃。通过对模型参数预测与验证，最终确定酿酒酵母菌剂热风干燥适宜的干燥温度为 42 ℃，时间为 20 min，菌剂水分含量为（5.24±0.12）%，菌存活率可达（48.24±0.15）%。

本研究结果明确细胞结合水的逃逸速率与菌存活率负相关，是菌快速死亡的主要影响因素。在实际生产中可通过添加抑制结合水干燥逃逸保护剂^[4]、调控热风干燥过程酿酒酵母结合水的逃逸速率，减缓细胞膜热胁迫损伤，提高菌存活率^[29]。

参考文献：

- [1] 尹卓蓉. 葡萄酒活性干酵母的使用方法 [J]. 酿酒, 1989, 16 (1): 20-23.
YIN Z R. Application method of wine active dry yeast [J]. *Liquor Making Science & Technology*, 1989, 16 (1): 20-23. (in Chinese)
- [2] BATT C A, TORTORELLO M L. Encyclopedia of food microbiology[M]. Oxford, 1999: 2335-2341.
- [3] 董家武, 李雪松. 国内活性干酵母生产的现状与发展 [J]. 食品科技, 2003, 28 (9): 7-10,13.
DONG J W, LI X S. Status and development for production of active dry yeast in China [J]. *Food Science and Technology*, 2003, 28 (9): 7-10,13. (in Chinese)
- [4] 张建峰, 耿宏伟, 王丕武. 酿酒活性干酵母生产工艺优化及干燥剂的选择 [J]. 食品科学, 2011, 32 (9): 213-216.
ZHANG J F, GENG H W, WANG P W. Process optimization and protective agents for alcohol active dry yeast [J]. *Food Science*, 2011, 32 (9): 213-216. (in Chinese)
- [5] 陈琪彤. 一株布拉氏酵母高密度发酵与干燥工艺的优化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
CHEN Q T. Optimization of A high-density fermentation and drying process for A strain of *Saccharomyces boulardii*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese).
- [6] 孙康, 李军, 张鸣宇, 等. 美极梅奇酵母冷冻干燥复合保护剂的优化研究 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48 (11): 73-79.
SUN K, LI J, ZHANG M Y, et al. Optimization of freeze-drying compound protective agent for *Metschnikowia pulcherrima* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48 (11): 73-79. (in Chinese)
- [7] 李东歌, 刘红艳, 叶冬青, 等. 一种葡萄酒活性干酵母简便制备法 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (8): 133-137.
LI D G, LIU H Y, YE D Q, et al. A simple preparation method of active dry yeast for wine making [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42 (8): 133-137. (in Chinese)
- [8] 周亚男. 鲁氏酵母高密度培养制备及产吡喃酮条件优化研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
ZHOU Y N. Optimization of high density culture and preparation of DMHF from *Z. rouxi*[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [9] 张鸿雁, 王文军, 邓丽莉, 等. 膜醭毕赤酵母真空干燥剂对热环境耐受力的提高 [J]. 食品科学, 2019, 40 (10): 112-120.
ZHANG H Y, WANG W J, DENG L L, et al. Improved tolerance of vacuum-dried *Pichia membranifaciens* to thermal environment [J]. *Food Science*, 2019, 40 (10): 112-120. (in Chinese)
- [10] 张鸿雁, 曾凯芳, 周雅涵, 等. 酵母热干燥法及其活性提高途径 [J]. 食品与机械, 2017, 33 (2): 205-210.

- ZHANG H Y, ZENG K F, ZHOU Y H, et al. Thermal drying methods of yeast and the ways to improve the activity [J]. *Food & Machinery*, 2017, 33 (2): 205–210. (in Chinese)
- [11] 安峰, 叶京生, 李芳, 等. 流化床吸附干燥酵母醪液的流化特性 [J]. *天津科技大学学报*, 2009, 24 (6): 68–70.
- AN F, YE J S, LI F, et al. Fluidization characteristics of yeast spent solution adsorbed in carrier [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2009, 24 (6): 68–70. (in Chinese)
- [12] 张艳艳. 酱油活性干酵母的制备及应用[D]. 天津: 天津科技大学, 2013.
- ZHANG Y Y. Preparation and application of soy sauce active dry yeast[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] STRASSER S, NEUREITER M, GEPPL M, et al. Influence of lyophilization, fluidized bed drying, addition of protectants, and storage on the viability of lactic acid bacteria [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 107 (1): 167–177.
- [14] 区伟佳, 王荣, 李华兴, 等. 高浓度大豆生防芽孢杆菌粉剂喷雾干燥微胶囊化工艺研究 [J]. *大豆科技*, 2010 (3): 3–6.
- QU W J, WANG R, LI H X, et al. Technology for micro-encapsulation of high density antifungal entophytic bacteria AF67 by spray drying [J]. *Soybean Science & Technology*, 2010 (3): 3–6. (in Chinese)
- [15] 陈毛清, 赵华. 葡萄酒活性干酵母的干燥工艺研究 [J]. *酿酒科技*, 2006 (8): 88–90.
- CHEN M Q, ZHAO H. Study on the drying techniques of active dry yeast of grape wine [J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2006 (8): 88–90. (in Chinese)
- [16] 梁璋成, 任香芸, 林晓姿, 等. 低产尿素、杂醇油红曲黄酒酵母的筛选及鉴定 [J]. *中国食品学报*, 2018, 18 (2): 265–271.
- LIANG Z C, REN X Y, LIN X Z, et al. Screening and identification of the yeast stains with low urea and fusel oil production for brewing in Hong qu (glutinous rice wine) [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18 (2): 265–271. (in Chinese)
- [17] 苏昊, 梁璋成, 林晓姿, 等. 酿酒酵母高密度增殖酒糟多肽糖蜜培养基优化 [J]. *福建农业学报*, 2021, 36 (5): 610–618.
- SU H, LIANG Z C, LIN X Z, et al. Optimized medium utilizing distiller's grains polypeptide for high-density culture of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (5): 610–618. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 食品卫生微生物学检验 霉菌和酵母计数: GB/T 4789.15—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [19] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品加工用酵母: GB 31639—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] CHEN B Y, LIANG Z C, LIN X J, et al. Enhanced survival of fluidized bed-dried microencapsulated *Saccharomyces cerevisiae* cells in the presence of Hongqu rice distiller's grain peptides [J]. *LWT*, 2022, 163: 113511.
- [21] HENDERSON S M, PABIS S. Grain drying theory I: temperature effect drying coefficient [J]. *Journal of Agricultural Research Engineering*, 1961, 6: 169–174.
- [22] WU J, LI L L, WU X Y, et al. Characterization of oat (*Avena nuda* L.) β -glucan cryogelation process by low-field NMR [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64 (1): 310–319.
- [23] 李直, 王丹, 董明盛, 等. 西藏灵菇菌粒、瑞士乳杆菌 LZ-R-5 与普通乳酸菌的发酵乳特性对比及低场核磁共振在其储藏期间水分的在线监测应用 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39 (21): 53–60.
- LI Z, WANG D, DONG M S, et al. Comparison of fermented milk characteristics of Tibetan kefir grains, *Lactobacillus helveticus* LZ-R-5 and common lactic acid bacteria and on-line monitoring application of low-field NMR in storage period [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39 (21): 53–60. (in Chinese)
- [24] MOMOSE Y, MATSUMOTO R, MARUYAMA A, et al. Comparative analysis of transcriptional responses to the cryo protectants, dimethyl sulfoxide and trehalose, which confer tolerance to freeze-thaw stress in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Cryobiology*, 2010, 60 (3): 245–261.
- [25] 赵雪, 陈超, 王文博, 等. 低场核磁共振分析乳酸菌细胞中水分分布及其变化 [J]. *食品与发酵工业*. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032365>.
- ZHAO X, CHEN C, WANG W B, et al. Study on water distribution and variation in lactic acid bacteria using low field NMR [J]. *Food and Fermentation Industry*. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032365>. (in Chinese)
- [26] 阮榕生. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 90–94.
- [27] FU N, CHEN X D. Towards a maximal cell survival in convective thermal drying processes [J]. *Food Research International*, 2011, 44 (5): 1127–1149.
- [28] FRANÇA M B, PANEK A D, ELEUTHERIO E C A. Oxidative stress and its effects during dehydration [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2007, 146 (4): 621–631.
- [29] SCHUCK P, JEANTET R, BHANDARI B, et al. Recent advances in spray drying relevant to the dairy industry: A comprehensive critical review [J]. *Drying Technology*, 2016, 34 (15): 1773–1790.

(责任编辑: 翁志辉)